

纳秒激光毫米级光斑辐照典型金属材料冲量耦合特性

于程浩, 周伟静, 常浩*, 陈一夫, 郭威

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 利用纳秒脉冲激光器对典型金属材料在毫米级烧蚀光斑尺寸下的冲量耦合特性进行了实验研究。基于典型扭摆测量系统测量激光烧蚀产生的冲量特性, 采用局部最小二乘法平移拟合的方法, 对扭摆振动产生的微小位移实验数据进行了预处理, 避免了噪声对冲量测量的干扰。设计了一种毫米量级烧蚀光斑尺寸测量方法。在此基础上, 实验获得了毫米量级光斑辐照金属靶材 Al 5A06、TC₄、30CrMnSiA 的冲量, 研究结果表明, 在相同能量密度的情况下, 钛合金 TC₄ 对应的冲量最大, TC₄ 获得的最大冲量耦合系数大于 Al 5A06 和 30CrMnSiA, 其对应的最优能量密度却是三种材料中最小的。为了分析烧蚀羽流对冲量耦合特性的影响, 估算了不同能量密度对应的羽流透射率, 计算结果表明, 当羽流透射率低于 0.3 时, 大量的入射激光能量被羽流吸收, 导致冲量耦合系数的下降。

关键词: 激光烧蚀; 毫米量级光斑; 冲量耦合特性; 羽流透射率

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200390

Impulse coupling characteristics of typical metal materials irradiated by nanosecond laser with a millimeter-scale spot size

Yu Chenghao, Zhou Weijing, Chang Hao*, Chen Yifu, Guo Wei

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: A nanosecond pulsed laser was used to study the impulse coupling characteristics of typical metal materials with millimeter ablation spot size. The impulse characteristics of laser ablation were studied based on a typical torsion pendulum measuring system. By using the method of translational fitting of the local least square method, the experimental data of small-displacement generated by torsion pendulum vibration were preprocessed, and the interference of noise to impulse measurement was avoided. A measurement method of millimeter scale ablation spot size was designed. On this basis, the impulse of millimeter scale spot irradiating metal target Al 5A06, TC₄, 30CrMnSiA was obtained in the experiment. The results showed that the impulse generated by irradiating titanium alloy TC₄ was the largest at the same laser fluence. And the maximum impulse coupling coefficient generated by irradiating TC₄ was greater than that of Al 5A06 and 30CrMnSiA. However, the optimal laser fluence of TC₄ was the smallest among the three materials. In order to analyze the influence of the ablation plume on the impulse coupling characteristics, the plume transmittance at different laser fluences was estimated. The results indicated that a large amount of incident laser energy was absorbed by the ablation plume when the plume transmittance was lower than 0.3, which caused a decrease of the impulse coupling coefficient.

Key words: laser ablation; mm scale spot size; impulse coupling characteristics; plume transmittance

收稿日期: 2020-10-12; 修订日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11502301; 11602304); 国家重点实验室基础研究项目; 校级创新基金

作者简介: 于程浩, 男, 硕士生, 主要从事激光烧蚀推进方面的研究。

通讯作者: 常浩, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。

导师简介: 周伟静, 女, 助理研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。

0 引言

近年来,激光烧蚀推进在空间中的应用越来越广泛,例如空间碎片清除^[1]、微纳卫星的变轨与姿态调整^[2]等领域。激光烧蚀推进利用的是高能脉冲激光与靶物质相互作用产生的反冲冲量,该过程也称为冲量耦合效应。对于激光烧蚀力学性能的评价,通常采用冲量耦合系数,其值为烧蚀冲量与脉冲激光能量的比值。因此,国内外就脉冲激光烧蚀的冲量耦合系数及其变化规律展开了广泛的研究,发现其受激光参数(波长和脉宽)^[3]、环境压强^[4]、光斑尺寸^[5]等诸多因素的影响,其中对于光斑尺寸的研究,主要集中在百微米量级光斑尺寸^[6],对于毫米量级的光斑研究较少。文中基于扭摆微冲量测量系统,研究了毫米量级聚焦光斑辐照靶材的冲量耦合特性,在数据预处理方面,基于局部最小二乘法对整个采样区间进行了平移数据拟合,避免了环境噪声对冲量测量产生的影响。设计了毫米量级的烧蚀光斑尺寸测量方法,测量了不同激光能量下对应的烧蚀光斑尺寸。此外,估算了不同能量密度下的羽流透射率,并分析了烧蚀羽流对冲量耦合特性的影响。

1 微冲量测量系统组成

图 1 为文中实验系统示意图,整个实验过程在真空仓内进行,仓内真空度设置为 10^{-2} Pa。实验中采用镭宝光电(Beamtech)公司生产的 Nimma-900 型 Nd:YAG 激光器作为激光源,输出的激光脉宽和波长分别为 8.7 ns 和 1064 nm。实验过程中,通过改变激光器的驱动电压来实现对输出激光能量的控制。真空仓的光学窗口和聚焦透镜会衰减入射激光能量,为了确保能量测量的准确性,在进行激光加载的前后均利用 Coherent 公司的 FieldMax 型能量计对到达靶面的激光能量进行了测量,并且每脉冲激光能量的误差低于 4%。

靶材为 Al 5A06、TC₄、30CrMnSiA 三种金属材料。激光经透镜聚焦于靶材表面,靶面产生反冲冲量,进而导致扭摆产生微小摆动。扭摆横梁的扭转角通过位移传感器进行直接测量,扭摆的俯视图如图 2 所示。在扭摆下方装有二维电动位移台,脉冲激光作用完后,通过控制位移台保证每个脉冲作用到新的靶面位置。

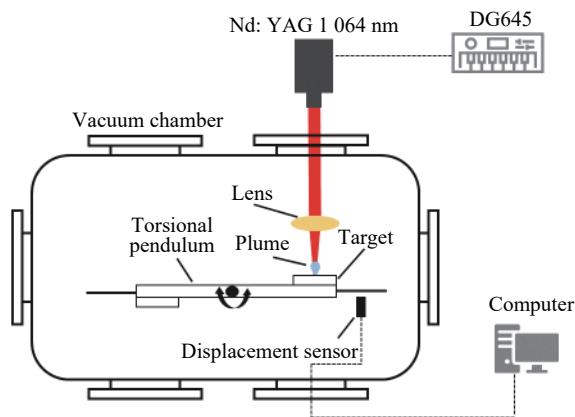


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

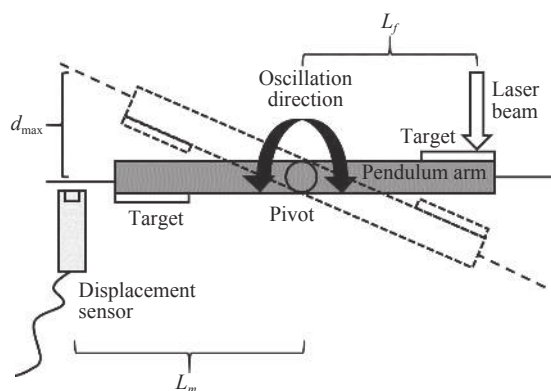


图 2 扭摆微冲量测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of torsion pendulum micro impulse measurement system

2 毫米级烧蚀光斑尺寸测量

冲量耦合系数 C_m 通常用来评估脉冲激光能量转化为烧蚀冲量的效率。冲量耦合系数为 $\phi\lambda\tau$ 的函数^[7],其中 λ 为激光波长, τ 为激光脉宽, ϕ 为能量密度,因此选定激光器后,冲量耦合系数主要与能量密度 ϕ 有关。能量密度 ϕ 的定义为脉冲激光能量 E 与光斑面积 S 的比值,因此光斑尺寸的测量尤为重要。

而对于文中的高能脉冲激光来说,一般可通过直接测量相纸^[8]、或利用光束质量分析仪等 CCD 设备^[9]来进行光斑尺寸的测量,但是由于脉冲激光能量较高,烧蚀相纸时具有明显的热传导,而光束质量分析仪等 CCD 设备前对高能脉冲激光的衰减,明显影响了测量结果^[6],因此在脉冲激光烧蚀的实验中,直接测量靶材上的烧蚀光斑更加方便可靠。并且 Tsuruta 等人^[6]通过对比分析多种材料的烧蚀光斑发现,铝

1050 这种材料比较适合用来定义烧蚀光斑尺寸,这是因为铝的烧蚀光斑尺寸随着激光能量的增加能够逐渐饱和,说明受热扩散影响较小;其次,铝的烧蚀光斑周围没有明显的喷射物堆积,具有明显的烧蚀光斑边界,便于测量。此外,文中主要研究光斑尺寸为毫米量级时的烧蚀冲量,而对于毫米量级或厘米量级的光斑尺寸,显然不适合用光学显微镜进行测量。为此,文中设计了如图 3 所示的毫米量级或厘米量级烧蚀光斑测量系统。

将相机固定于多维度调节台上,将 USAF1951 标定板固定于夹持架上,通过相机镜头将视场调节清晰后,根据标定板参数确定分辨率;固定相机和镜头位置,将标定板换为脉冲激光烧蚀后的靶片,拍照后根据此前获得的视场分辨率确定烧蚀光斑尺寸。实验中测量 Al 5A06 烧蚀冲量时对应的烧蚀光斑尺寸如图 4 所示,可以看出,随着单脉冲激光能量的增加,光

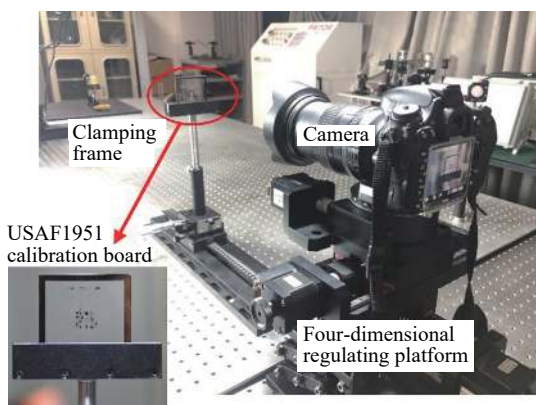


图 3 mm 量级或 cm 量级光斑尺寸测量系统

Fig.3 Measurement system for mm-level or cm-level spot size

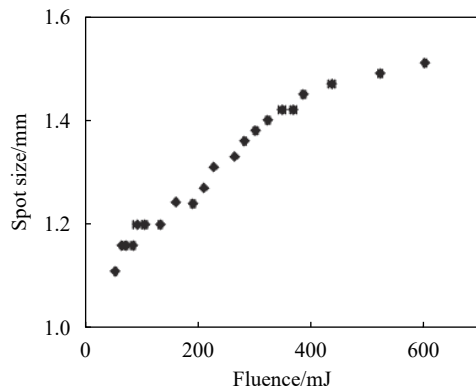


图 4 测量 Al 5A06 的烧蚀冲量时,光斑尺寸随激光能量的变化

Fig.4 Variation of spot size with the laser fluence when measuring the ablation impulse generated by irradiating Al 5A06 target

斑尺寸逐渐趋于饱和。

3 冲量测量方法

3.1 脉冲激光微冲量测量方法

根据扭摆微冲量测量方法^[10],冲量 I 可以表示为:

$$I = \frac{J\omega_n}{L_f} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \theta_{\max} \quad (1)$$

式中: L_f 为烧蚀力臂; ω_n 为固有频率; J 为转动惯量; ζ 为阻尼比; θ_{\max} 为最大扭转角。

脉冲激光烧蚀产生的微冲量所导致的扭摆横梁摆动,满足小角度假设条件,因此有:

$$\theta_{\max} \approx \sin \theta_{\max} \approx \frac{d_{\max}}{L_m} \quad (2)$$

式中: d_{\max} 为高精度位移传感器测量得到的扭摆横梁最大位移; L_m 为测量臂。因此,冲量 I 与 d_{\max} 的关系为:

$$I = \frac{J\omega_n}{L_f L_m} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) d_{\max} \quad (3)$$

式中: 阻尼比 ζ 、无阻尼振动频率 ω_n 、转动惯量 J 为系统参数,需要在冲量测试前进行标定获得。典型的扭摆横梁扭转角随时间的变化如图 5 所示。

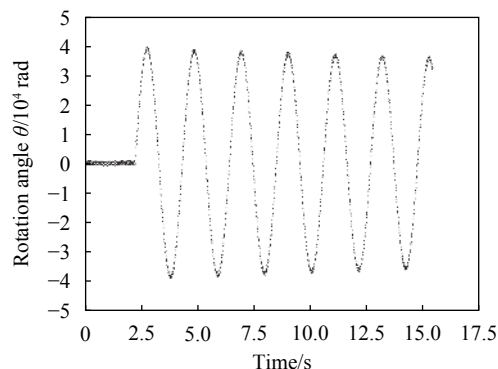


图 5 脉冲激光作用后,典型的扭转角随时间的变化

Fig.5 The typical changes of torsion angle with time after the pulse laser was applied

3.2 实验数据处理

由于环境干扰的存在,造成位移传感器测量获得的位移数据在平衡位置上下波动,给直接计算冲量带来了干扰,因此需要对实验测量数据进行预处理,以减小测量噪声对冲量计算结果的影响。对于这类噪声,通常采用最小二乘拟合方法寻找试验数据点 $(x_i, y_i)(i = 0, 1, \dots, m)$ 的平均位置。

在实际的烧蚀冲量测量中,拟合整个数据采集区间内的实验数据时,在波峰波谷处出现了拟合误差较大的情况,因此采用由局部到整体的拟合方法。对于需要拟合的每个实验数据点 (x_i, y_i) ,在其附近选取 $2k+1$ 个数据点 $(x_{i-k}, y_{i-k}), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_{i+k}, y_{i+k})$,利用最小二乘法进行拟合。从采样的起点到终点,均进行上述局部拟合,最终获得整个采样区间的拟合结果,如图 6 所示,该方法能够较好的对实验数据进行平滑降噪处理。

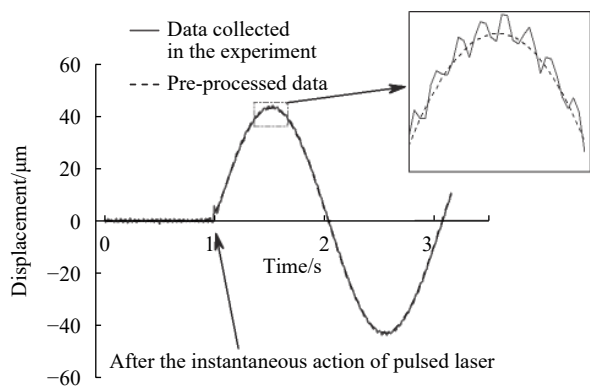


图 6 实验数据的预处理结果
Fig.6 Preprocessing results of experimental data

4 结果与讨论

4.1 冲量耦合特性

图 7 给出了 Al 5A06 铝靶、TC₄ 钛合金靶、30CrMnSiA 不锈钢靶三种金属材料在不同能量密度下的冲量。实验中能量密度范围为 2.25~25.81 J/cm²,对应的功率密度为 0.26×10⁹~2.97×10⁹ W/cm²。可以看出三种材料的冲量均随着能量密度的增加线性增加。并且在相同能量密度下,钛合金 TC₄ 对应的冲量是三种材料中最大的,略大于烧蚀 30CrMnSiA 不锈钢靶获得的冲量,明显大于烧蚀 Al 5A06 铝靶材获得的冲量。这是因为当入射激光为 1064 nm 时,钛合金对激光的吸收率较高,而此时铝的吸收率较低^[11],即在相同能量密度下,钛合金相对于其他两种金属材料将耦合更多的激光能量,因此将获得更大的冲量。

图 8 给出了 Al 5A06、TC₄、30CrMnSiA 三种金属材料在不同能量密度下的冲量耦合系数。可以发现无论哪种金属材料,冲量耦合系数均随着能量密度的增加,先迅速增加到最大值,随后逐渐减小,并且普遍

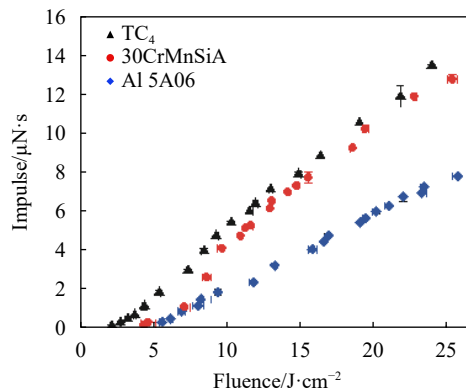


图 7 不同能量密度下,三种金属材料对应的冲量测量结果

Fig.7 The impulse of the three metal materials irradiated at different laser fluences

认为冲量耦合系数的下降是等离子体屏蔽效应导致的^[12]。由于铝靶对入射激光的反射率较高,而钛合金和不锈钢对入射激光的反射率相对铝来说较低^[13],烧蚀铝靶将损失更多的激光能量,能量耦合效率较低,因此,激光烧蚀 TC₄ 靶材获得的最大冲量耦合系数略大于烧蚀 30CrMnSiA 靶材,明显大于烧蚀 Al 5A06 靶材。通常我们称最大冲量耦合系数对应的能量密度为最优能量密度,可以发现,三种金属材料中,最大冲量耦合系数越大,对应的最优能量密度越小,即利用较低的脉冲激光能量,烧蚀 TC₄ 可以获得较好的冲量耦合效果。

能量密度为 14 J/cm² 时,由图 7 可知,烧蚀铝靶获得的冲量为 3.5 μN·s,而前期研究中,烧蚀光斑尺寸为 270 μm 时,14 J/cm² 的能量密度对应的冲量却只有 0.4 μN·s^[10]。这是由于在相同的能量密度下,烧蚀光斑越大,对应的脉冲激光能量就越高,沉积到靶面上的激光能量将烧蚀更多的靶物质,产生更强的等离子体羽流喷射,获得更高的反冲冲量。此外,图 8 中脉冲激光烧蚀铝靶获得的最大冲量耦合系数为 20 μN·s/J,而前期研究中,烧蚀光斑尺寸为 270 μm 时,烧蚀铝靶获得的最大冲量耦合系数为 30 μN·s/J^[10],说明光斑尺寸越大,脉冲激光能量转化为靶材冲量的效率越低。这是由于光斑尺寸为 270 μm 时,等离子体羽流的喷射满足一维膨胀模型^[14-15],并且羽流接近于细长圆柱形^[9],即等离子体羽流主要沿着垂直于靶面的方向喷射,而当光斑尺寸为毫米量级时,羽流为近似半球形^[16],即羽流除了沿着靶面法向喷射外,还会沿着平行于靶面的方向迅速膨胀,由于靶材冲量的获得来自

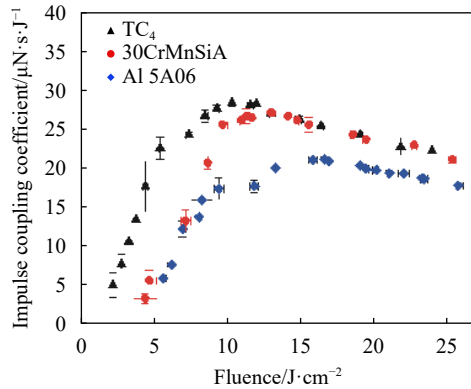


图 8 不同能量密度下, 三种金属材料对应的冲量耦合系数

Fig.8 The impulse coupling coefficient of the three metal materials irradiated at different laser fluences

于羽流喷射引起的反冲, 因此, 光斑尺寸为百微米时, 脉冲激光能量转化为靶材冲量的效率更高, 而且冲量耦合系数通常用来表示脉冲激光能量转化为靶材冲量的效率, 即百微米聚焦光斑条件下获得的冲量耦合系数更大。

4.2 烧蚀羽流对冲量耦合特性的影响

烧蚀羽流吸收入射激光能量, 导致到达靶面的激光能量减少, 进而影响冲量耦合效应。等离子体羽流对入射激光的吸收能力可以用羽流对入射激光的透射率来表示。简化的羽流透射率表达式如下^[17]:

$$\left(\frac{C_{mi}}{C_{m1}}\right)^2 = \frac{\xi_1^2 (\ln \tau_i + \ln \xi_i) \tau_i \xi_i - 1}{\xi_i^2 \ln \xi_i \xi_i - 1} \quad (4)$$

其中

$$\xi_1 = \frac{\phi_1}{\phi_0}, \xi_i = \frac{\phi_i}{\phi_0} \quad (5)$$

式中: 下标 i 表示该量对应一确定的能量密度。 ϕ_0 、 ϕ_1 、 ϕ_i 分别表示产生靶蒸汽的能量密度阈值、实验中使用的最低能量密度以及某一确定的能量密度。 C_{m1} 表示能量密度为 ϕ_1 时对应的冲量耦合系数, τ_i 表示能量密度 ϕ_i 对应的透射率。基于公式 (4) 和公式 (5) 获得的羽流对入射激光的透射率及其对应的冲量耦合系数如图 9 所示。

可以看出, 随着能量密度的增加, 三种材料对应的羽流透射率先是急剧降低, 当冲量耦合系数达到最大值后, 透射率减小趋缓。这是由于入射激光能量主要被羽流中的等离子体所吸收, 而等离子体的密度主要与电离度有关, 电离度随着能量密度的增加先急剧增加, 随后逐渐饱和^[18]。此外, 当冲量耦合系数达到

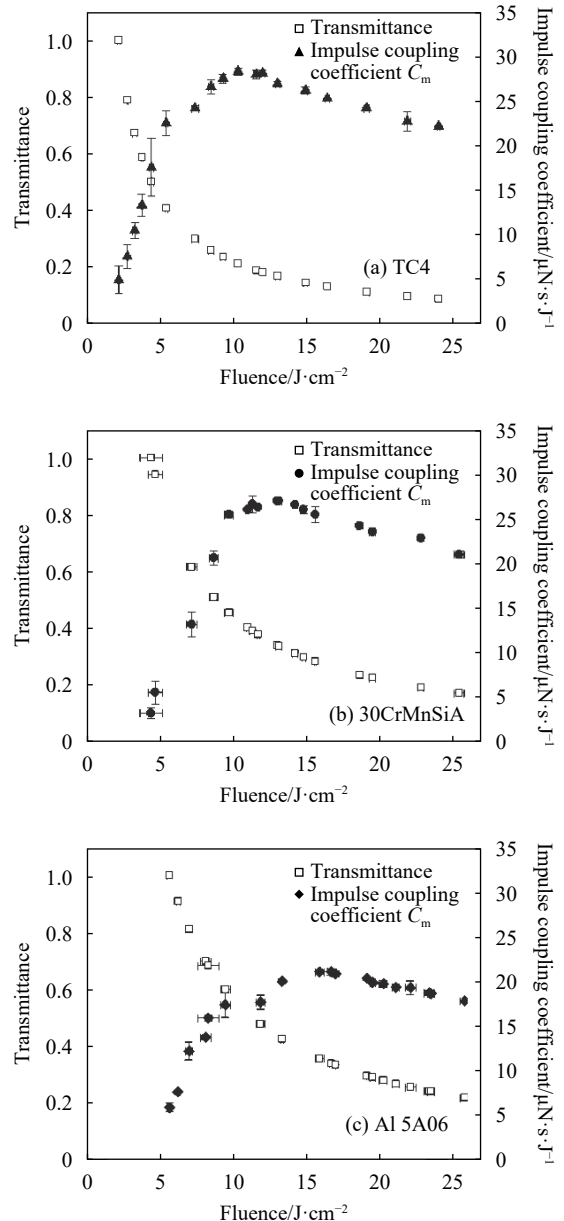


图 9 透射率与能量密度的关系

Fig.9 The relationship between the transmittance and the laser fluence

最大值时, 透射率大约为 0.3, 即此时多数激光能量被等离子体羽流吸收。当能量密度大于最优能量密度后, 羽流的透过率低于 0.3, 即产生了很强的等离子体屏蔽效应, 激光能量无法到达靶面进行冲量耦合, 进而导致冲量耦合系数逐渐下降。

5 结论

在利用扭摆微冲量测量系统采集实验数据时, 为了减小噪声对冲量计算的干扰, 利用局部最小二乘法平移拟合的方法对整个采样区间内的实验数据进行

了数据拟合,较好地找到了数据的平衡位置。此外,文中设计了大光斑尺寸测量方法,实现了对毫米量级或厘米量级的光斑尺寸测量。在此基础上,基于扭摆微冲量测量原理获得了毫米量级光斑辐照金属靶材 Al 5A06、TC₄、30CrMnSiA 的冲量,可以发现,在相同能量密度的情况下,钛合金 TC₄ 对应的冲量是三种材料中最大的,略大于烧蚀 30CrMnSiA 靶材获得的冲量,明显大于烧蚀 Al 5A06 靶材获得的冲量。并对比分析了三种金属靶材的冲量耦合特性,TC₄ 获得的最大冲量耦合系数大于 Al 5A06 和 30CrMnSiA 所获得的最大冲量耦合系数,而其对应的最优能量密度却是三种材料中最小的,即利用较低的能量,TC₄ 可以获得较好的冲量耦合效果。最后,基于羽流透射率方程,估算了不同能量密度对应的羽流透射率,分析了烧蚀羽流对冲量耦合特性的影响,透射率随着能量密度的增加先是急剧降低,当冲量耦合系数达到最大值时,羽流透射率达到 0.3,此时大量的入射激光能量被羽流吸收,即产生了较强的等离子体屏蔽效应;随着能量密度的进一步增加,增强的等离子体屏蔽效应使得冲量耦合系数有所下降。

参考文献:

- [1] Kang B, Jin X, Chang H. Simulation analysis of orbit characteristics of space debris irradiated by space-based laser system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0329005. (in Chinese)
- [2] Chang H, Ye J, Zhou W, et al. Analysis of attitude influence of nano-satellite platform by micro thrust output of fuel tape micro laser thruster [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S213001. (in Chinese)
- [3] Wen M, Li N, Wu J. Experimental study on impulse coupling characteristics of 532 nm/1 064 nm laser ablated Al target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106005. (in Chinese)
- [4] Tran D, Yogo A, Nishimura H, et al. Impulse and mass removal rate of aluminum target by nanosecond laser ablation in a wide range of ambient pressure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(23): 233304.
- [5] Sinko J E, Ichihashi K, Tsukiyama Y, et al. CO₂ laser ablation propulsion area scaling with polyoxymethylene propellant[C]//Scottsdale (Arizona): 2010: 207-218.
- [6] Tsuruta H, Dondelewski O, Katagiri Y, et al. Ablation spot area and impulse characteristics of polymers induced by burst irradiation of 1 μm laser pulses [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 136: 46-54.
- [7] Sinko J E, Phipps C R. Modeling CO₂ laser ablation impulse of polymers in vapor and plasma regimes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131105.
- [8] Wang Y, Deng C, Su Y, et al. Study on in-situ measurement of laser spot size on target surface [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(9): 1054-1059. (in Chinese)
- [9] Li X, Wei W, Wu J, et al. The Influence of spot size on the expansion dynamics of nanosecond-laser-produced copper plasmas in atmosphere [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(24): 243304.
- [10] Zhou W, Chang H, Ye J, et al. Impulse of planar and sphere target by nanosecond laser ablation in a large beam spot [J]. *Laser Physics*, 2020, 30(6): 066002.
- [11] Boyden S B, Zhang Y. Temperature and wavelength-dependent spectral absorptivities of metallic materials in the infrared [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(1): 9-15.
- [12] Phipps C R, Luke J R, Lippert T, et al. Micropropulsion using laser ablation [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4-6): 1385-1389.
- [13] Schneider M, Berthe L, Fabbro R, et al. Measurement of laser absorptivity for operating parameters characteristic of laser drilling regime [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(15): 155502.
- [14] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single - pulse lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(3): 1083-1096.
- [15] WANG B. Laser ablation impulse generated by irradiating aluminum target with nanosecond laser pulses at normal and oblique incidence [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(1): 014101.
- [16] Chang H, Jin X, Ye J, et al. Flow field characteristics of nanosecond pulsed laser ablation propulsion with typical materials under vacuum conditions [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1427-1433.
- [17] Zhao X T, Tang F, HAN B, et al. The influence of laser ablation plume at different laser incidence angle on the impulse coupling coefficient with metal target [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(21): 213103.
- [18] Chang H, Jin X, Wen M, et al. Analytical model for calculating laser ablation impulse coupling coefficient [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1110-1114. (in Chinese)